بررسی تأثیر استفاده از انواع غشاء های پلیمری و شرایط عملکردی بر پیل سوختی غشاء پلیمری در یک سیستم برق پشتیبان (UPS)

بهاره السادات توکلی مهرآبادی[۱]، رامین روشندل*[۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۹۰/۱/۱۵
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۹۰/۴/۲۰

چکیده:

باتوجه به نیاز روز افزون بشر به انرژی حرارتی و کاهش منابع انرژی فسیلی در جهان، نیاز به استفاده از انرژهای نو مورد توجه جدی قرار گرفته است. در این راستا انرژی خورشیدی در جهت تامین قسمتی از انرژی مورد نیاز جوامع بشری در آینده در اولویت قرار دارد. استفاده از کلکتورهای خورشیدی بدون شیشه با صفحه جاذب مشبک بدلیل راندمان بالا و هزینه‌ی کم یکی از راه های تامین انرژی در زمینه گرمایش هوای مورد نیاز فضاهای بزرگ مانند کارخانجات و کارگاه ها و همچنین در خشک کردن محصولات کشاورزی است. در این پژوهش عملکرد حرارتی این کلکتورها که در فضای باز نصب می شوند و در معرض مستقیم تابش خورشید و وزش باد می باشند مورد بررسی قرار گرفته است. با فرض وزش باد در راستای عمود بر صفحه کارایی حرارتی صفحات جاذب با جنس‌های مختلف و میزان تخلخل متفاوت در چند حالت سرعت و مکش جریان مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به آنالیزهای تحلیلی صورت گرفته ابتدا عوامل موثر بر کارایی حرارتی این کلکتورها مشخص گردید و در ادامه تاثیر هر عامل بر کارایی حرارتی این کلکتورها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین انتقال حرارت از پشت صفحه که در اکثر تحقیقات گذشته مورد محاسبه واقع نمی‌گردید، لحاظ شده است. نتایج نشان می‌دهد که رفتار کلی این صفحات و کارایی حرارتی آنها تحت تاثیر پارامترهای مشخص شده تا حدود قابل ملاحظه‌ای مشابه به حالت وزش باد بصورت جریان موازی با صفحه بوده و تنها در برخی موارد اختلافاتی مشاهده شده است.

کلمات کلیدی:
سیستم برق پشتیبان، پیل سوختی، غشاء پلیمری، مدل سازی، محتوای آب

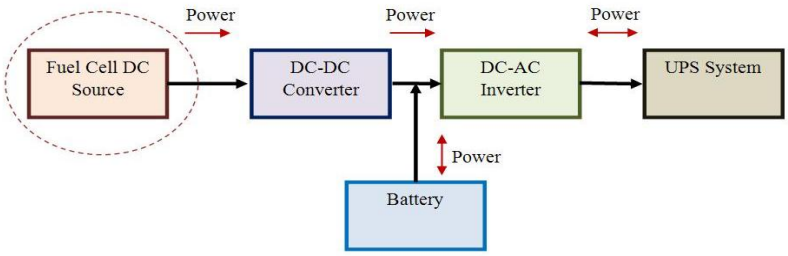
۱) دانشجوی دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی
۲) استاد دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی
* نویسنده مسئول

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

مقدمه

پیل سوختی غشاء پلیمری یک مولد توان است که انرژی شیمیایی هیدروژن و اکسیژن را به طور مستقیم و بدون واسطه به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. کارایی بالا و عدم نشر آلودگی های زیست محیطی، منجر به معرفی پیل های سوختی غشاء پلیمری به عنوان نسل جدیدی از وسایل مولد توان گشته است[۱۶]. از جمله مهمترین فواید استفاده از پیل های سوختی غشاء پلیمری می توان به دمای عملیاتی کم، انعطاف پذیری بالا نسبت به استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی و تولید دانسیته توان بالا و قابل مقایسه با موتورهای احتراق داخلی اشاره نمود[۶]. با توجه به فواید ذکر شده، این فناوری قابلیت استفاده در کاربردهای قابل حمل، صنایع نیروگاهی و حمل ونقل را دارا می باشد. پیشرفت های اخیر در زمینه پیل های سوختی دریچه جدیدی را برای این فناوری برای کاربرد در سیستم های برق پشتیبان باز کرده است. سیستم برق پشتیبان دستگاهی است که با قرارگیری بین برق شهر و مصرف کننده به هنگام بروز مشکل در برق شهر با بهره گیری از توان مولدهای متصل به آن تا رفع مشکل، جایگزین برق شهر می گردد[۱۲]. طراحی یک سیستم برق پشتیبان با استفاده از فناوری پیل سوختی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل۱: سیستم برق پشتیبان

در این مقاله، تأثیر انواع غشاء و شرایط عملکردی بر پیل سوختی غشاء پلیمری به منظور تأمین توان سیستم برق پشتیبان برای تامین توان یک کیلوواتی سرور کامپیوتر و مرکز تلفن پژوهشکده انرژی شریف مورد توجه قرار گرفته است. در جدول (۱) مشخصات مجموعه پیل سوختی مورد نظر آورده شده است.

جدول۱: مشخصات مجموعه پیل سوختی

پارامتر	مقدار	واحد
توان الکتریکی	۱	kW
تعداد تک سل	۱۰	-
سطح مؤثر سل	۱۰۰	Cm^2

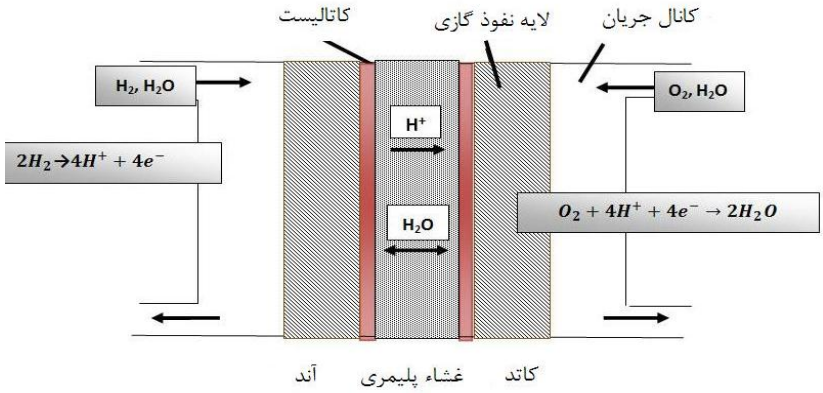
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

یک پیل سوختی غشاء پلیمری شامل دو الکترود آند و کاتد و یک غشاءپلیمری می باشد. هر الکترود به سه قسمت کانال های عبور جریان، لایه های نفوذ گازی وسطح کاتالیست تقسیم می شود. هیدروژن در قسمت آند وارد شده و پس از عبور از لایه نفوذ گازی در سطح کاتالیست بر اساس واکنش زیر اکسید می گردد.

$$2\mathrm{H}_2 \rightarrow 4\mathrm{H}^+ + 4\mathrm{e}^- \quad (۱)$$

پروتون های تولیدی از غشاء پلیمری عبور کرده و به سمت کاتد حرکت می کنند. الکترون ها نیز از مدار خارجی جریان می یابند. گاز اکسیژن در قسمت کاتد وارد شده و پس از عبور از لایه نفوذ گازی در لایه کاتالیستی با پروتون های عبوری از غشاء واکنش داده و آب تولید می کند.

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \quad (۲)$$



شکل۲: شماتیک تک سل پیل سوختی

واکنش کلی پیل سوختی به صورت زیر می باشد.

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + electricity \quad (۳)$$

از مهمترین اجزای تشکیل دهنده ی پیل سوختی غشاء پلیمری تبادل یون می باشد. غشای پلیمری در پیل سوختی دو وظیفه عمده بر عهده دارد، اول جداسازی سوخت و اکسید کننده و دوم انتقال یون های هیدروژن از آند به سمت کاتد. با توجه به آنکه هدایت یون های پروتون برعهده ی غشاء پلیمری می باشد، لذا افت اهمی و به دنبال آن عملکرد پیل سوختی وابستگی بسیار زیادی به عملکرد غشاء پلیمری دارد.

فرضیات مدل

فرضیات مورد استفاده در این در مقاله جهت ساده سازی معادلات به صورت زیر می باشد:

۱- عملکرد پیل سوختی در شرایط پایدار بررسی می شود.
۲- معادلات به صورت تک فاز و تک جزیی حل می شوند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

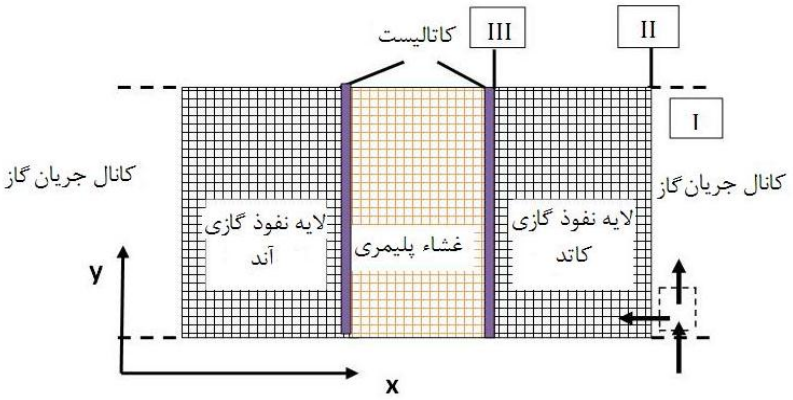
۳- عملکرد پیل در شرایط دما ثابت فرض می شود[۳].
۴- گازها با توجه به فشار و دمای عملکردی به عنوان گاز کامل تراکم ناپذیر فرض می شوند[۲،۳].
۵- از ضخامت لایه کاتالیستی صرف نظر می شود. لایه کاتالیستی به صورت یک سطح تماس بین غشا و لایه نفوذ گازی در نظر گرفته می شود[۳].

از نفوذ پذیری غشا نسبت به گازهای واکنش دهنده صرف نظر می شود[۱].

شکل(۲) محدوده عملکردی پیل سوختی را نشان می دهد.

معادلات

هدف از انجام این پروژه بررسی عملکرد سیستم پیل سوختی است که بدین منظور باید منحنی قطبیدگی تک سل پیل سوختی بدست آید. در همین راستا باید ولتاژپیل سوختی و دانسیته جریان آن بدست آید.



شکل۳: محدوده ی مدلسازی

ولتاژ پیل سوختی از رابطه (۴) بدست می آید [۷].

$$V = V_{oc} - \eta_{act} - \eta_{conc} - \eta_{ohm} \quad (۴)$$

V_{oc}ولتاژ مدار باز سیستم است و بر اساس قانون نرنست محاسبه می شود[۷].

$$V_{oc} = 1/229 - 0/9 \times 10^{-3}(T - 298) + \frac{RT}{4F}\mathrm{Ln}\left(P_{H_2}^2 P_{O_2}\right) \quad (۵)$$

دانسیته جریان متوسط پیل از انتگرال گیری بر روی دانسیته جریان های محلی در سطح الکترود بدست می آید.

$$I_{ave} = \left(\frac{1}{L}\right)\int_0^L j(y)\,dy \quad (۶)$$

افت پتانسیل ناشی از غلظت از رابطه (۷) بدست می آید[۱۴].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{2F} Ln(1 - \frac{j}{j_L}) \quad (۷)$$

$$j_L = \frac{2FD_{O_2}C_{O_2}}{\delta_{GDL}} \quad (۸)$$

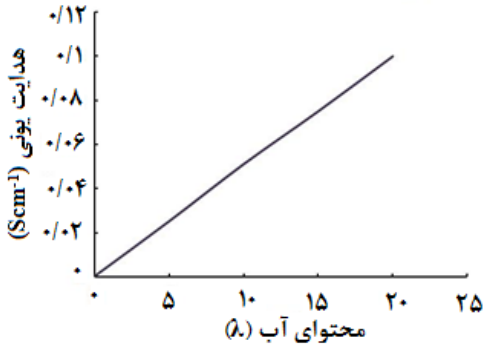
افت پتانسیل در غشاء بدلیل مقاومت غشاء در برابر عبور یون ها می باشد و از رابطه زیر بدست می آید[۳].

$$\nabla.(\sigma(\lambda).\nabla\varphi) = 0 \quad (۹)$$

φ پتانسیل الکتریکی و $\sigma(\lambda)$ هدایت یونی غشاء می باشد. برای حل توزیع پتانسیل در غشاء ، پتانسیل یونی در مرز غشاء / کاتالیست آند به صورت یکنواخت برابر صفر در نظر گرفته شده و در لایه مرزی غشاء/کاتالیست کاتد یک شار منفی برابر مصرف پروتون ها در لایه کاتالیستی مشخص شده است[۴]. در سطح غشاء/ کاتالیست کاتد بر اساس قانون اهم رابطه ی (۱۰) برقرار است[۱۵].

$$\frac{d\varphi}{dy} = \left(\frac{j(y)}{\sigma_c}\right) \quad (۱۰)$$

σ هدایت پروتونی غشاء می باشد که به ماهیت غشاء مورد بررسی وابسته است. برای مثال در مورد دو غشای نافیون و گرسلکت این پارامتر وابستگی شدیدی به محتوای آب در غشاء دارد. شکل (۴) این وابستگی را نشان می دهد. هدایت پروتونی این غشاء ها به ترتیب از روابط (۱۱) و(۱۲) بدست می آید[۳]:



شکل ٤: وابستگی هدایت یونی به محتوای آب در غشاء

در مورد غشاء پلی بنزیمیدازول این وابستگی به آب وجود ندارد وتنها تابعی از دما و پارامترهای فیزیکی غشاء می باشد. هدایت پروتونی پلی بنزیمیدازول از رابطه ی (۱۳) بدست می آید.

$$\sigma(\lambda, T) = (0/005139\lambda - 0/00326)\exp\left[1268(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})\right] \quad (۱۱)$$

$$\sigma(\lambda, T) = \frac{1}{2} \times (0/005139\lambda - 0/00326)\exp\left[1268(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})\right] \quad (۱۲)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

$$\sigma(X,\mathrm{T}) = \frac{100}{T}\exp[8/0219 - \left(\frac{2605/6 - 70/1X}{T}\right)] \quad (۱۳)$$

λ محتوای آب در غشاء می باشد و براساس رابطه ی(۱۴) به ضریب فعالیت آب وابسته است [۲].

$$\lambda = 14a_{H_2O} \qquad \text{for} \quad 0 < a_{H_2O} \leq 1 \quad (۱۴)$$

$$\lambda = 12/6 + 1/4a_{H_2O} \text{ for} 1 < a_{H_2O} \leq 3 \quad (۱۵)$$

همچنین ضریب فعالیت آب به صورت زیر تعریف می شود [۲،۱۵]:

$$a_{H_2O} = {X_{H_2O}P}/{P_{sat}} \quad (۱۶)$$

P^{sat} فشار بخار اشباع آب تابعی از دمای پیل است و از رابطه ی(۱۷) بدست می آید[۷،۶].

$$log P_w^{sat} = -2/1794 + 0/02953\mathrm{T} - 9/1837 \times 10^{-5}(\mathrm{T})^2 + 1/4454 \times 10^{-7}(\mathrm{T})^3 \quad (۱۷)$$

در رابطه (۱۷) T دما بر حسب درجه ی سانتی گراد می باشد. و در رابطه (۱۶) X_{H2O} جزء مولی اکسیژن در مرز غشاء/آند و غشاء/ کاتد می باشد. به منظور محاسبه این پارامتر باید معادلات انتقال جرم مربوط به آب در لایه های نفوذ گازی و غشاء پلیمری مورد بررسی قرار گیرد.

در لایه نفوذ گازی انتقال جرم بر اساس قانون فیک به صورت زیر می باشد:

$$N_i = -D_{H_2O}^{eff}\nabla C_{H_2O} \quad (۱۸)$$

شرایط مرزی برای حل این معادله در لایه نفوذ گازی آند/ سطح کاتالیست به صورت زیر می باشد:

$$N_{H2O}^{ACL} = {\beta j}/{2F} \quad (۱۹)$$

و برای لایه نفوذ گازی کاتد/کاتالیست روابط زیر برقرار است:

$$N_{H2O}^{CCL} = {(1+\beta)j}/{2F} \quad (۲۰)$$

F ثابت فارادی و β نسبت شار آب عبوری از غشاء به شار پروتون ها می باشد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\beta = \frac{N_{H2O}^{m}}{\frac{j}{2F}} \quad (۲۱)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

انتقال آب در غشاء ناشی از سه پدیده ی کشش الکترواسمتیک، نفوذ و جابجایی می باشد. انتقال آب در غشاء به صورت زیر تعریف می شود:

$$\nabla.\mathrm{N_{drag}} + \nabla\mathrm{N_{conv}} + \nabla\mathrm{N_{diff}} = 0 \quad (۲۲)$$

شار مولی آب در غشاء ناشی از پدیده کشش الکترو اسمتیک می باشد و از رابطه ی (۲۳) بدست می آید. شار مولی آب ناشی از نفوذ است و همان طور که در رابطه ی (۲۴) نشان داده شده است از قانون فیک تبعیت می کند. شار مولی آب در اثر پدیده جابجایی می باشد و از رابطه ی (۲۵) محاسبه می گردد:

$$\nabla.\mathrm{N_{drag}} = \frac{n_d j}{F} \quad (۲۳)$$

$$\nabla\mathrm{N_{diff}} = -\mathrm{D_w^{PEM}}\nabla\mathrm{C_w^{PEM}} \quad (۲۴)$$

$$\nabla\mathrm{N_{conv}} = \mathrm{UC_w^{PEM}} \quad (۲۵)$$

U سرعت توده سیال است و از قانون دارسی بدست می آید:

$$\mathrm{U} = -{\mathrm{k_m}\nabla\mathrm{P}}/{\mu} \quad (۲۶)$$

n_d و $\mathrm{D_w^{PEM}}$ و $\mathrm{C_w^{PEM}}$ به ترتیب ضریب کشش الکترواسمتیک آب در غشاء، ضریب نفوذ آب و غلظت آب در غشاء می باشد و از روابط (۲۷)، (۲۸) و (۳۰) محاسبه می گردند[۹،۱۵].

$$n_d = {2/5\lambda}/{22} \quad (۲۷)$$

$$\frac{\mathrm{D_w^{PEM}}}{\mathrm{D_T}} = \begin{cases} 1 & \lambda < 2 \\ 1 + 2(\lambda - 2) & 2 < \lambda < 3 \\ 3 - 1/38(\lambda - 3) & 3 < \lambda < 4 \\ 2/563 - 0/33\lambda + 0/0264\lambda^2 - 0/00067\lambda^3 4 < \lambda \end{cases} \quad (۲۸)$$

$$\mathrm{D_T} = 10^{-10}\exp\left[2416\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{\mathrm{T}}\right)\right] \quad (۲۹)$$

$$C_w = \frac{\rho_{\mathrm{m}}^{\mathrm{dry}}\lambda}{\mathrm{M_m}(1 + \mathrm{s}\lambda)} \quad (۳۰)$$

به منظور محاسبه ی دانسیته جریان محلی از رابطه ی باتلر والمر استفاده می گردد. در این مقاله افت پتانسیل فعال سازی به عنوان ورودی می باشد و با توجه به تغییرات غلظت اکسیژن در طول کانال، دانسیته جریان تولید شده در راستای y متفاوت خواهد بود. لایه کاتالیستی در این مقاله به صورت یک سطح نازک در نظر گرفته شده است و دانسیته جریان تولیدی بر روی لایه کاتالیستی از رابطه (۳۱) بدست می آید.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

$$j(\mathrm{y}) = \mathrm{j}_0^{\mathrm{ref}} \frac{\mathrm{C}_{\mathrm{O}_2}^{\mathrm{ccl}}(\mathrm{y})}{\mathrm{C}_{\mathrm{O}_2}^{\mathrm{ref}}} \exp\left(\frac{4\alpha \mathrm{F}\eta_{\mathrm{c}}}{\mathrm{RT}}\right) \quad (۳۱)$$

در این معادله عبارت jc چگالی جریان الکتریکی محلی تولیدی در کاتد می باشد. پارامتر j_0^{ref} به عنوان چگالی جریان تبادلی شناخته می شوند. تعبیر فیزیکی این پارامتر چگالی تبادلی جریان واکنشگرها بروی الکترود در وضعیت تعادل واکنش شیمیایی است. $\mathrm{C}_{\mathrm{O}_2}^{\mathrm{ccl}}(\mathrm{y})$ غلظت محلی اکسیژن بر روی لایه کاتالیستی می باشد.میزان اکسیژن مصرف شده بر اثر واکنش الکتروشیمیایی باید از طریق نفوذ از لایه نفوذ گازی فراهم گردد. شار نفوذ اکسیژن در لایه نفوذ گازی از رابطه (۳۲) بدست می آید.

$$N_i = -D_{O_2}^{eff} \nabla C_{O_2} \quad (۳۲)$$

میزان اکسیژن مصرفی در مرز غشاء/کاتالیست کاتد از رابطه (۳۳) بدست می آید.

$$\mathrm{N}_{\mathrm{O2}}^{\mathrm{CCL}} = {}^{j}/_{4F} \quad (۳۳)$$

شار اکسیژن عبوری از لایه نفوذ گازی برابر شار اکسیژنی است که توسط مکانیسم جابجایی بین کانال جریان و سطح لایه نفوذ گازی انتقال می یابد.

$$\mathrm{N}_{\mathrm{O}_2}^{\mathrm{conv}} = \mathrm{N}_{\mathrm{O2}}^{\mathrm{CCL}} = \mathrm{N}_{\mathrm{O2}}^{\mathrm{GDL}} \quad (۳۴)$$

برای سادگی مدل، کانال جریان با سطح مقطع مربع در نظر گرفته شده است. فرایند انتقال جرم جابجایی بین کانال جریان و لایه نفوذ گازی به صورت زیر می باشد:

$$\mathrm{N}_{\mathrm{O}_2}^{\mathrm{conv}} = -h_m(C_{\mathrm{II}}^{O_2}(y) - \overline{C}_{\mathrm{I}}^{O_2}(y)) \quad (۳۵)$$

h_m ضریب انتقال جرم جابجایی، $\overline{C}_{\mathrm{I}}^{O_2}$ متوسط غلظت اکسیژن در کانال جریان می باشد و از رابطه (۳۶) محاسبه می گردد[۵].

$$h_m = \frac{Sh_F D_{O_2}}{H_c} \quad (۳۶)$$

$$C_{\mathrm{III}}^{O_2}(y) = C_{\mathrm{II}}^{O_2}(y) - \frac{\delta_{\mathrm{GDL}} j(y)}{4F D_{O_2}^{\ eff}} \quad (۳۷)$$

$$C_{\mathrm{II}}^{O_2}(y) = \overline{C}_{\mathrm{I}}^{O_2}(y) - \frac{j(y)}{4F h_m} \quad (۳۸)$$

با در نظر گرفتن موازنه شارهای ورودی و خروجی به حجم کنترل در نظر گرفته شده در شکل(۳) انتقال جرم راستای x با انتقال جرم راستای y به یکدیگر مرتبط می گردد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

$$u_{in}H_c\overline{C}_{\mathrm{I},y=0}^{O_2} - u_{in}H_c\overline{C}_{\mathrm{I},y}^{O_2} = \int_0^y \mathrm{N}_{\mathrm{O}_2}^{\mathrm{conv}}\,\mathrm{dy} \quad (۳۹)$$

$$\int_0^y \mathrm{N}_{\mathrm{O}_2}^{\mathrm{conv}}\,\mathrm{dy} = \int_0^y \frac{j(y)}{4F}dy \quad (۴۰)$$

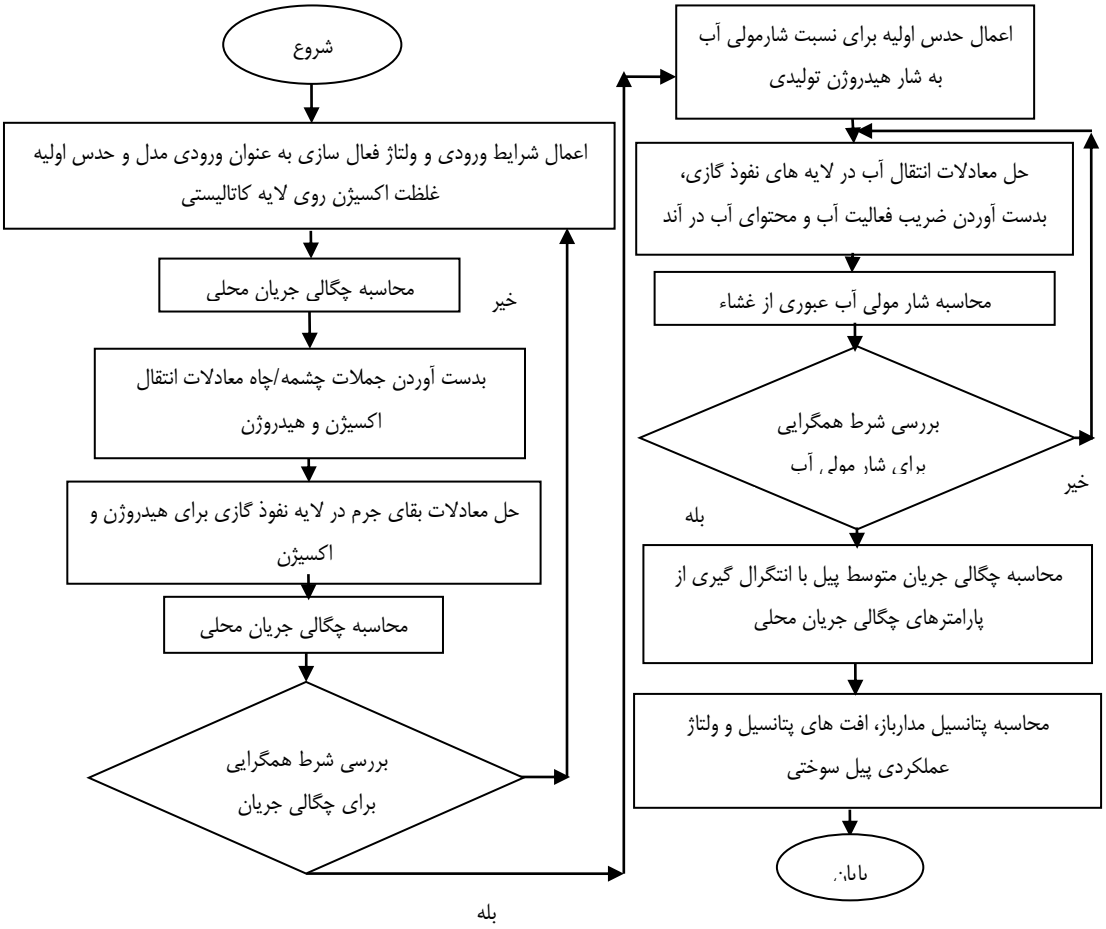
غلظت اکسیژن در لایه کاتالیستی از رابطه ی زیر بدست می آید.

$$C_{\mathrm{III}}^{O_2}(y) = \overline{C}_{\mathrm{I},y=0}^{O_2} - \frac{1}{4F}\left(\frac{j(y)}{h_m} + \frac{\delta_{\mathrm{GDL}}j(y)}{{D_{O_2}}^{eff}} + \int_0^y \frac{j(y)}{u_{in}H_C}dy\right) \quad (۴۱)$$

روش حل

در شروع حل پارامترهای غلظت گازهای واکنش دهنده و آب همراه آن ها، دمای عملیاتی و فشارهای آند و کاتد به عنوان ورودی وارد مدل می گردد و حدس مقدار غلظت اکسیژن بر روی لایه کاتالیستی برابر با مقدار غلظت اکسیژن ورودی به کانال در نظر می شود. برای بدست آوردن منحنی پلاریزاسیون در هر مرحله پتانسیل فعال سازی به صورت ورودی به کد داده می شود. ابتدا مدل با توجه به معادله باتلر- والمر بر اساس غلظت اکسیژن ورودی چگالی جریان را محاسبه می کند و سپس بر اساس معادلات مربوط به مرز مشترک کانال و لایه نفوذ گازی، معادلات مربوط به غلظت اکسیژن در لایه کاتالیستی محاسبه می شود و بر اساس مقادیر غلظت جدید، چگالی جریان جدید محاسبه می گردد و در صورت وجود اختلاف کمتر از ۴-۱۰ شرط همگرایی حاصل شده و در غیر این صورت مجدداً مقدار غلظت اکسیژن جدید برای لایه کاتالیستی در نظر گرفته شده و تکرار روش حل صورت می گیرد. پس از بدست آمدن چگالی جریان محلی مقادیر چشمه جرمی د ر مرز لایه کاتالیستی/ لایه نفوذ گازی محاسبه می گردد و بدین ترتیب معادلات مربوط به انتقال جرم اکسیژن و هیدروژن در لایه ی نفوذ گازی حل می شوند. برای انجام محاسبات مربوط به آب ابتدا مقدار نسبت شار مولی آب به شار پروتون های تولیدی(β) حدس زده می شود و بر اساس چگالی جریان محاسبه شده در قسمت قبل، مقدار غلظت آب در دو طرف غشا بدست می آید. در نتیجه محتوای آب در آند و کاتد محاسبه شده و سپس معادلات مربوط به آب در لایه های نفوذ گازی و در غشای پلیمری حل می شود. در نهایت شار مولی عبوری از غشا محاسبه شده و مقدار (β) جدید بدست می آید. در صورتیکه اختلاف دو مقدارکمتر از ۴-۱۰ باشد شرط همگرایی حاصل شده و در غیر این صورت با مقدار جدید (β) روند حل تکرار می شود. بعد از تکرار حل و بدست آمدن چگالی جریان الکتریکی، افت پتانسیل ناشی از غلظت، افت پتانسیل اهمیک و همچنین ولتاژ سیستم محاسبه می شود. فرایند فوق یک نقطه ولتاژ- جریان را از منحنی پلاریزاسیون بدست می دهد و با داشتن تعداد کافی از نقاط می توان منحنی پلاریزاسیون مدل را رسم نمود. فلوچارت حل مدل برای ترسیم منحنی ولتاژ-جریان در شکل (۵) نشان داده شده است. شرایط و پارامترهای هندسی مدل در جدول (۲) آمده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]



شکل ۵: الگوریتم حل

بحث و نتیجه گیری

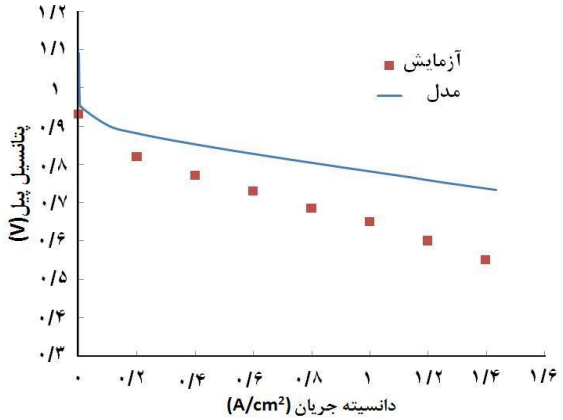
به منظور اعتبار بخشی به مدل نتایج بدست آمده از مدل با داده های تجربی ارائه شده توسط گوالیگو[1] مورد ارزیابی قرار گرفته است[۳]. همان طور که در شکل (۶) نشان داده شده است. نتایج مدل در دانسیته جریان های کم با داده های تجربی تطابق قابل قبولی دارد. با افزایش دانسیته جریان اختلاف بین حل عددی و داده های تجربی زیاد می شود. در نظر گرفتن آب به صورت تک فاز یکی از دلایل عمده ی این تفاوت است. از طرف دیگر در این مقاله از مقاومت های تماسی صرف نظر شده است که می تواند تأثیر بسزایی در منحنی قطبیدگی داشته باشد. پارامترهای مورد استفاده جهت اعتبار بخشی به مدل در جدول (۳) آورده شده است.

[1] Guveliglu

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

جدول ۲: شرایط و پارامترهای هندسی مورد استفاده در مدل

پارامتر	مقدار	منبع
دما (K)	۳۵۳	
فشار در سمت آند (atm)	۳	
فشار در سمت کاتد (atm)	۵	
طول کانال (m)	۵×۱۰^{-۲}	
عرض کانال(m)	۱×۱۰^{-۳}	
ضخامت لایه نفوذ گازی(m)	۳×۱۰^{-۴}	
ضخامت غشاء (m)	۱۷۵×۱۰^{-۶}	[۸]
عبور پذیر ی هیدرولیکی غشاء (m^2)	$۱/۶\times۱۰^{-۱۸}$	[۸]
ضریب انتقال[1]	۰/۵	[۱۳]
تخلخل لایه نفوذ گازی	۰/۳	
دانسیته غشاء در حالت خشک (Kgm^{-3})	۱۸۰۰	[۸]
غلظت اکسیژن در حالت مرجع ($molm^{-3}$)	۴۰/۸۸	[۱۱]
دانسیته جریان حالت مرجع (Am^{-2})	۱	[۱۴]
نفوذ هیدروژن در لایه نفوذ گازی آند (m^2s^{-1})	$۱/۱۰۲۸\times۱۰^{-۴}$	[۸]
نفوذ اکسیژن در لایه نفوذ گازی کاتد (m^2s^{-1})	$۳/۲۳۴۸\times۱۰^{-۵}$	[۱۱]
نفوذ آب در لایه نفوذ گازی آند (m^2s^{-1})	$۱/۱۰۲۸\times۱۰^{-۴}$	[۱۱]
نفوذ آب در لایه نفوذ گازی کاتد (m^2s^{-1})	$۷/۳۵\times۱۰^{-۵}$	[۱۱]

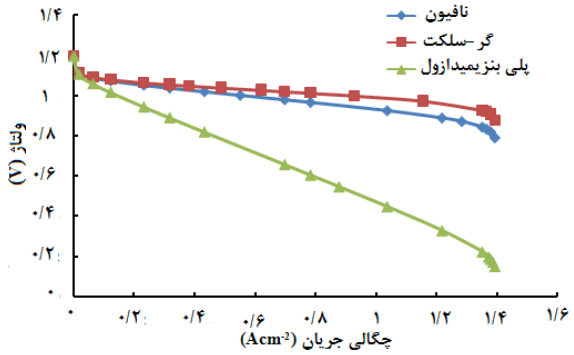


شکل ٦: اعتباربخشی به مدل

[1] Cathodic transfer coefficient

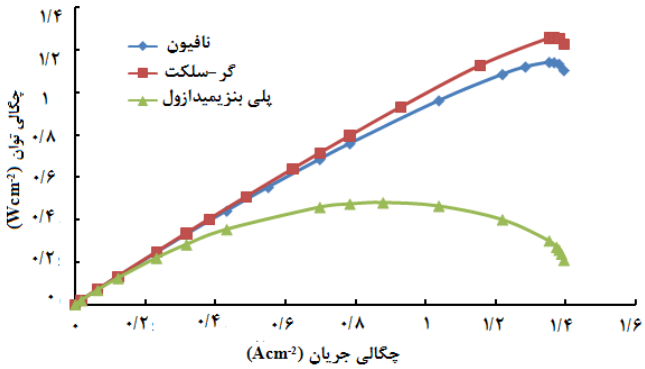
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

تأثیر غشاء بر عملکرد پیل: در شکل (۷) منحنی قطبیدگی تک سل پیل سوختی برای سه غشاء نافیون، گرسلکت و پلی بنزیمیدازول در شرایط ورودی یکسان رسم شده است منحنی توان بدست آمده از انواع غشاء نیز در شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده توان پیل سوختی با غشاء پلی بنزیمیدازول کمترین مقدار را دارد و مقدار توان بدست آمده از دو غشاء نافیون و گرسلکت به یکدیگر نزدیک می باشد.



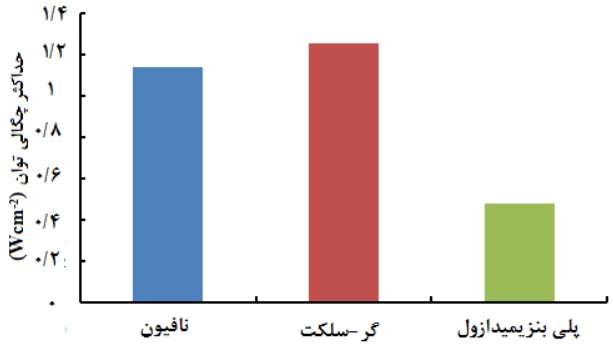
شکل۷: منحنی قطبیدگی پیل سوختی برای سه غشاء پلیمری مختلف

حداکثر توان بدست آمده از هر تک سل پیل سوختی با غشاء های گوناگون در شکل (۹) رسم شده است. همان طور که شکل (۸) نشان می دهد حداکثر توان بدست آمده از غشاء گرسلکت بیشترین مقدار را دارا می باشد. در نتیجه در سری پیل سوختی نیز غشاء گرسلکت بیشترین توان را دارد، این مسئله در شکل(۱۰) نشان داده شده است. همان طور که اشاره شد هدایت پروتونی غشاء پلی بنزیمیدازول تابعی از دما است. نتایج مدل نشان می دهد که حتی با افزایش دمای کارکردی پیل تا دمای ۴۳۰ درجه سانتیگراد نیز حداکثرتوان بدست آمده از تک سل پیل سوختی به اندازه ی حداکثر توان تک سل پیل سوختی با غشاء های نافیون و گرسلکت نمی باشد. در شکل(۱۱) این نتایج نشان داده شده است.

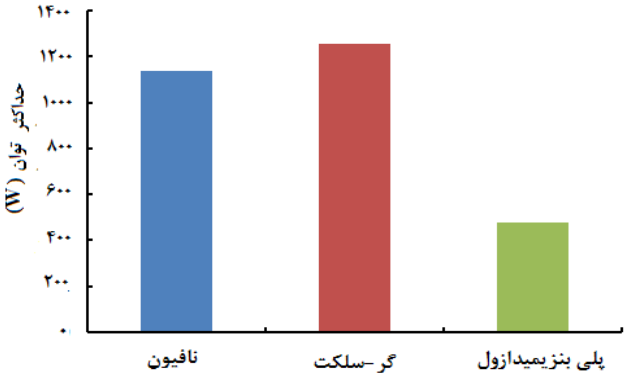


شکل۸: منحنی توان پیل سوختی برای سه غشاء پلیمری مختلف

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]



شکل ۹: حداکثر توان بدست آمده در تک سل پیل سوختی از سه غشاء پلیمری



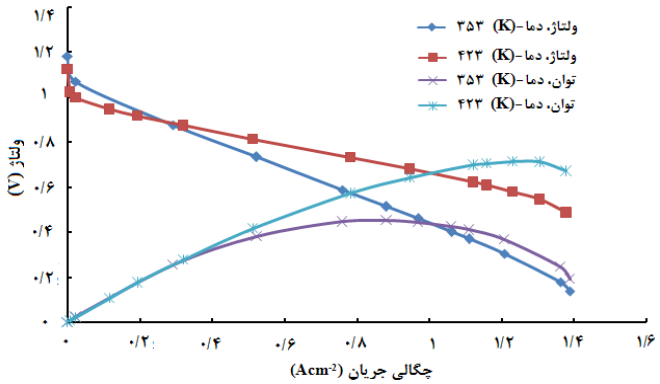
شکل ۱۰: حداکثر توان بدست آمده در سری پیل سوختی از سه غشاء

جدول ۳: پارامترهای مورد استفاده جهت اعتباربخشی به مدل

پارامتر	مقدار
دما (K)	۳۵۳
فشار در سمت آند (atm)	۳
فشار در سمت کاتد (atm)	۵
طول کانال (m)	۷×۱۰^{-۲}
عرض کانال (m)	۱×۱۰^{-۳}
ضخامت لایه نفوذ گازی (m)	$۲/۶\times۱۰^{-۴}$
ضخامت غشاء (m)	$۲/۳\times۱۰^{-۴}$
ضریب تخلخل لایه نفوذ گازی	۰/۶

با توجه به وابستگی هدایت پروتونی غشاءهای نافیون و گرسلکت به آب، مدیریت آب در این غشاء ها یکی از موارد اساسی در طراحی و کاربرد پیل سوختی غشاء پلیمری است.

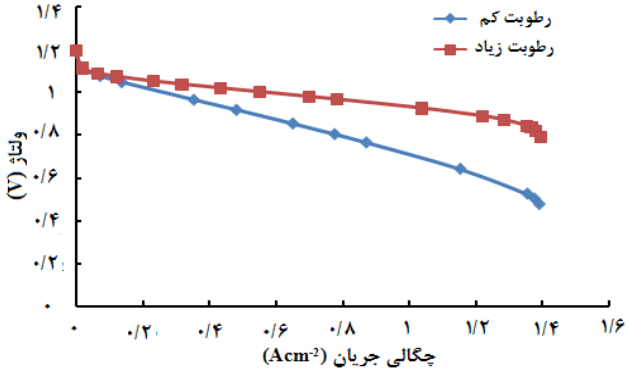
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]



شکل۱۱: منحنی عملکرد تک سل پیل سوختی با غشاء پلی بنزیمیدازول در دو دما

از یک سو عدم وجود آب کافی منجر به خشک شدن غشاء گشته و این امر مقاومت اهمی پیل را به سرعت افزایش می دهد. از طرف دیگر وجود بیش از اندازه آب منجر به پدیده ی طغیان در الکترودها گشته که نتیجه ی آن مسدود شدن منافذ لایه نفوذ گازی و از دست رفتن مسیرهای انتقال گاز می باشد[۱۰]. بنابراین برای دست یابی به کارایی بهینه پیل سوختی غشاء پلیمری، تعادل مقدار کافی آب برای اطمینان از هدایت پروتونی مناسب و جلوگیری از پدیده طغیان امری ضروری است. بدین منظور بررسی انتقال آب در پیل سوختی غشاء پلیمری، پارامتری کلیدی جهت بهینه سازی کارایی پیل سوختی می باشد[۲].

در شکل (۱۲) تغییرات منحنی قطبیدگی تک سل پیل سوختی با غشاء نافیون در دو مقدار رطوبت ورودی در نظر گرفته شده نشان داده شده است. همان طور که شکل نشان می دهد با افزایش میزان رطوبت عملکرد پیل به میزان قابل توجهی بهبود یافته است.



شکل۱۲: منحنی عملکرد تک سل پیل سوختی با غشاء نافیون در دو میزان رطوبت اولیه

در شکل (۱۳) توزیع محتوای آب (λ) در غشاء و جزء مولی آب در لایه نفوذ گازی آند و کاتد برای غشاء نافیون رسم شده است. در شکل(۱۳- الف) جزء مولی آب در لایه نفوذ گازی آند برای سه دانسیته جریان مختلف ۰/۵، ۱/۰۵ و ۰/۲۱ (Acm^{-2}) ارائه شده است. همان طور که درشکل نشان داده شده است جریان به صورت یکنواخت است و تغییرات آن قابل صرف نظر کردن می باشد. در غشای پلیمری همان طور که درشکل (۱۳- ب) نشان داده شده است،

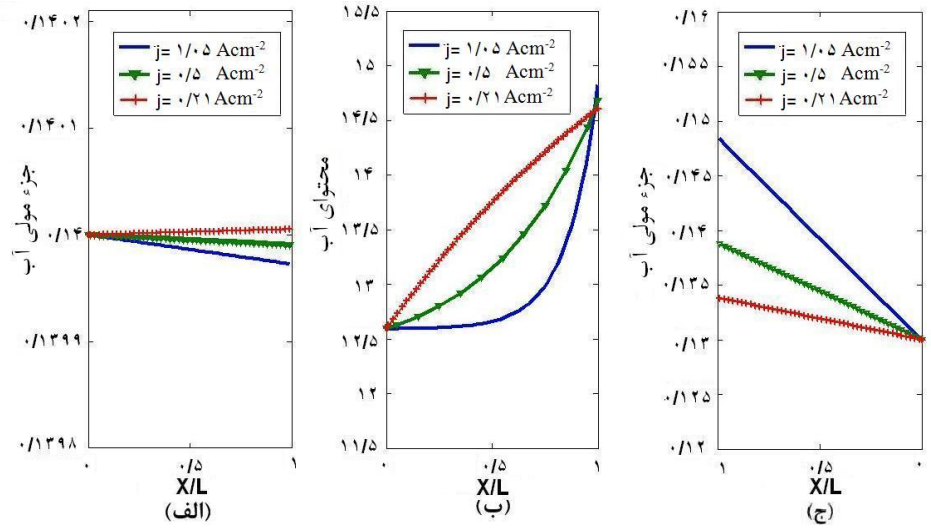
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

حداکثر محتوای آب در مرز کاتد اتفاق می افتد، چرا که تولید آب در این قسمت صورت می گیرد. مقدار محتوای آب از کاتد به سمت آند کاهش می یابد.

در دانسیته جریان های کم (۰/۲۱(Acm^{-2})) محتوای آب در مرز کاتد کمترین مقدار را دارد اما کاهش آن به سمت آند با شیب کمتری صورت می گیرد که این امر منجر می گردد محتوای آب متوسط در این حالت بیشتر از حالت های دیگر باشد. در مقابل در دانسیته جریان های بالا محتوای آب در مرز غشا/ کاتد بیشتر از دو حالت دیگر است اما کاهش سریعتری دارد. دلیل این امر آن است که هنگامی که پیل در دانسیته جریان های کم کار می کند جریان ناشی از نفوذ غالب است و در نتیجه میزان آب در مرز آند بیشتر می گردد اما با افزایش دانسیته جریان اثر الکترواسمتیک زیاد شده و در نتیجه از میزان آب در مرز آند کاسته می شود.

محتوای آب در غشاء ارتباط مستقیمی با هدایت یونی غشاء دارد و تابعی از ضریب فعالیت بخارآب است. در میزان محتوای آب بالاتر مقاومت کمتری در غشاء در برابر عبور پروتون ها وجود دارد و در نتیجه کارایی بهتری برای پیل پیش بینی می شود. دانستن توزیع محتوای آب در غشاء به منظور آگاهی از مقاومت غشاء در برابر عبور پروتون ها و چگونگی مد یریت آب امری ضروری است. مقادیر بدست آمده برای محتوای آب در طول غشاء برای سه میزان متفاوت رطوبت اولیه در شکل (۱۴) نشان داده شده است. پارامترهای مورد استفاده در جدول (۴) موجود است.

همان طور که قابل انتظار است میزان آب در جهت کاتد به دلیل پدیده ی الکترواسمتیک و تولید آب بیشتر از سمت آند است. با افزایش میزان رطوبت، تغییرات محتوای آب در سمت کاتد به آرامی افزایش می یابد در حالیکه این تغییرات در سمت آند بیشتر است. در رطوبت های کم تغییرات محتوای آب به صوت غیر خطی است در حالیکه در رطوبت های بالا توزیع آب یکنواخت تر و تغییرات آن خطی می باشد.



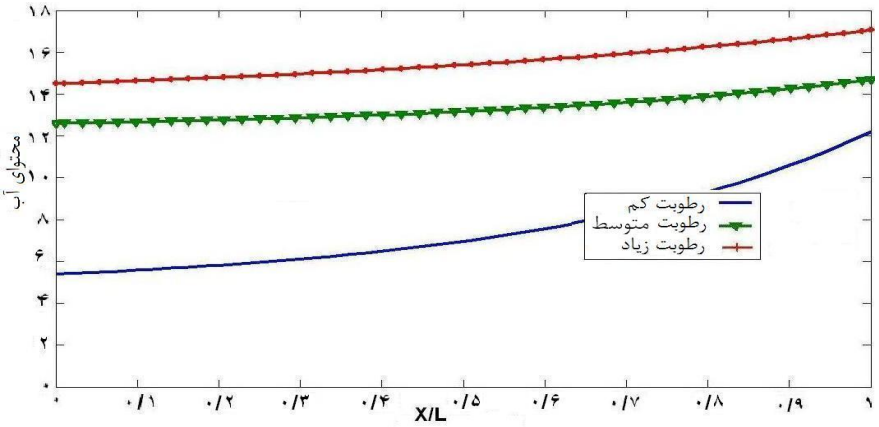
شکل ۱۳: توزیع آب در دانسیته جریان های ۰/۲۱، ۰/۵ و ۱/۰۵ (Acm^{-2})

الف) لایه نفوذ گازی آند، ب) غشاء پلیمری، ج) لایه نفوذ گازی کاتد

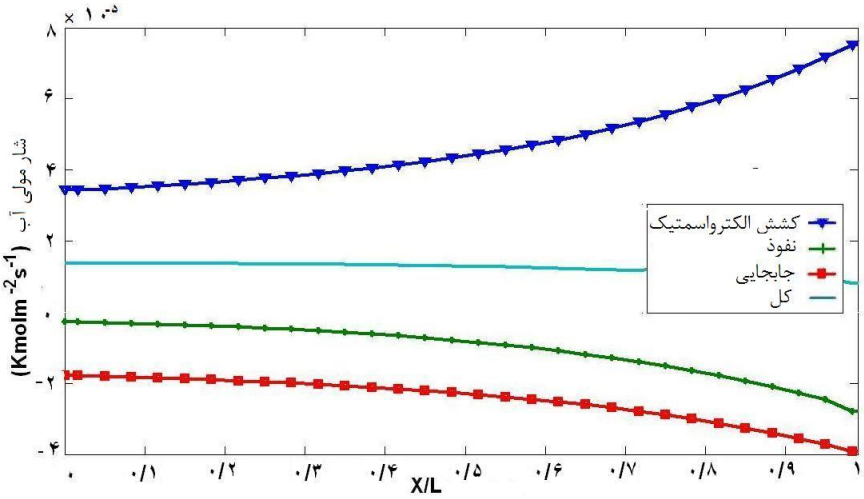
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

جدول ٤: مقادیر رطوبت گازهای ورودی

رطوبت زیاد	رطوبت متوسط	رطوبت کم	ترکیبات
آند			
۰/۷۹	۰/۸۶	۰/۹۴	**هیدروژن**
۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۰۶	**آب**
کاتد			
۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۱۹۳	**اکسیژن**
۰/۲۹	۰/۱۳	۰/۰۷۲	**آب**
۰/۰۷۲	۰/۶۹	۰/۷۳۵	**نیتروژن**



شکل ۱٤: محتوای آب در طول غشاء برای سه میزان متفاوت رطوبت



شکل۱۵: شارهای مختلف آب در غشاء در دانسیته جریان ۰/۵ (Acm^{-2})

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

شکل (١٥) توزیع شارهای مختلف آب در غشاء را برای دانسیته جریان ٠/٥ (Acm^{-2}) نشان می دهد. همان طور که قبلاً بحث شد شار کلی آب ترکیبی از سه مکانیسم نفوذ، جابجایی و کشش الکترواسمتیک می باشد. براساس آن که چه مکانیسمی غالب است مولکول های آب می توانند از سمت آند به سمت کاتد حرکت کنند (در این مقاله جهت مثبت) و یا حرکت آن ها از کاتد به سمت آند باشد. همان طور که مشخص است انتقال جرم ناشی از جابجایی اثر قابل توجهی بر انتقال جرم کلی دارد و قابل صرف نظر نمی باشد. در این دانسیته جریان میزان آب ناشی از نفوذ بیشتر از مجموع میزان آب ناشی از جابجایی و کشش الکترواسمتیک می باشد لذا شار خالص آب از آند به سمت کاتد است.

نتیجه گیری

یکی از کاربردهای پیل های سوختی، استفاده از آنها در سیستم های برق پشتیبان می باشد. غشاء پلیمری یکی از مهمترین اجزاء تشکیل دهنده پیل سوختی غشاء پلیمری است و نقش مهمی در کارایی پیل ایفا می کند. با توجه به وابستگی هدایت یونی برخی از انوع غشاء به میزان آب موجود در غشاء، مدیریت آب یکی از موارد اساسی در طراحی و کاربرد پیل سوختی غشاء پلیمری است. در این مقاله یک مدل پایا، هم دما و دو بعدی به منظور مقایسه عملکرد انواع گوناگون غشاءهای پلیمری توسعه داده شده است همچنین شبیه سازی محاسبات تعادل آب در غشاء برای شرایط عملیاتی ذکر شده مورد بررسی قرار گرفته است. منحنی قطبیدگی پیش بینی شده با نتایج تجربی ذکر شده قابل مقایسه می باشد. نتایج مدل نشان می دهد که در شرایط یکسان حداکثر توان تولیدی در پیل سوختی با غشاء گرسلکت بیشتر از دو غشای دیگر می باشد و غشای پلی بنیزیمیدازول حداقل توان را تولید می کند که حتی با افزایش دمای عملکرد پیل نیز توان تولیدی مقدار کمی دارد. همچنین نتایج نشان می دهد که اثر تغییرات توزیع دانسیته جریان بر روی محتوای آب در مرز غشاء الکترود به ویژه در دانسیته جریان های بالا قابل ملاحظه است. اگرچه مدل حاضر بر پایه فرضیات ساده استوار است اما نتایج قابل توجهی به منظور مقایسه عملکرد انواع گوناگون غشاء و بررسی مدیریت آب برای پیش بینی کارایی پیل سوختی در شرایط مختلف عملیاتی به منظور تولید یک کیلووات برق مصرفی در سیستم برق پشتیبان به دست آمده است. در این مدل اثرات سایر قسمت های سیستم برق پشتیبان نادیده گرفته شده است که در کارهای بعدی مورد نظر می باشد.

منابع

[1] Bernardi D.M. and Verbrunge M.W, 1992, A Mathematical Model of the Solid-Polymer-Electrolyte Fuel Cell, Journal of Electrochem, Soc. Vol.139, PP. 2477-2491.

[2] D.S. Falcao et al, 2009, Water Transport through a PEM Fuel Cell : A one – Dimensional Model with Heat Transfer Effects, Journal of Chemical Engineering Science, Vol. 64, PP. 2216-2225.

[3] G.H. Guvelioglu and H.G. Stenger, 2005, Computational Fluid Dynamics Modeling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, Journal of Power Sources, Vol.147, PP. 95-106.

[4] H. Ju. and C.Y. Wang, 2004, Experimental Validation of a PEM Fuel Cell Model by Current Distribution Data, Jornal of Electrochemical Society, Vol.151, PP.A1954-A1960

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

[5] S. Mazumder, 2005, A generalized Phenomenological Model and Database for the Transport of Water and Current in Polymer Electrolyte Membranes, Journal of Electrochemical Society. Vol.152, PP.A1633-A1644

[6] M. Miansari. et al., 2009, Experimental and thermodynamic approach on proton exchange membrane fuel cell performance, Journal of Power Sources. Vol.190, PP. 356-361.

[7] M.V. Moreira, and G.E. Silva, 2009, A Practical Model for Evaluating the Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells, Renewable Energy, Vol.34, PP. 1734-1741.

[8] U. Pasaogullari. and C.Y. Wang, 2004, Liquid Water Transport in Gas diffusion Layer of Polymer Electrolyte Fuel Cell, Journal of Electrochemical Society, VOl. 151, PP. A399-A406.

[9] B.P.M. Rajani. and A.K. Kolar, 2007, A Model for a Vertical Planner Air Breading PEM Fuel Cell, Journal of Power Sources, Vol. 164, PP. 210-221.

[10] M.G. Stantarelli. et al., 2006, Parameters Estimation of a PEM Fuel Cell, Journal of Power Sources, Vol. 159, PP. 824-835.

[11] B.R. Sivertsen. and N. Djilali, 2005, CFD-Based Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells, Journal of Power Sources, Vol. 141, PP. 65-78.

[12] G. Squadrito. et al., 2010, Design and Development of a 7kW Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stack for UPS Application, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, PP. 9983–9989.

[13] W.Q. Tao. et al., 2006, Parameter Sensitivity Examination and Discussion of PEM Fuel Cell Simulation model Validation, Journal of Power Sources. Vol.160, PP. 359-373.

[14] L. You. and Ho. Liu., 2002, A Two Phase Flow and Transport Model for the Cathode of PEM Fuel Cells, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45, PP. 2277-2287.

[15] L. You. and Ho. Liu., 2006, A Two Phase Flow and Transport Model for PEM Fuel Cells, Journal of Power Sources, Vol. 155, PP.219-230.

[16] L.J. Yu. et al., 2009, Transport Mechanisms and Performance Simulations of a PEM Fuel Cell with Interdigitated Flow Field, Renewable Energy, Vol. 34, PP. 530-543.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]